



# Dimenzionisanje sistema za raspodelu vazduha (I)

W. Moog\*

## 1. UVOD

Vazдушna postrojenja se ugrađuju u zgradama iz dva razloga:

1) zbog poboljšavanja uslova sredine u kojoj ljudi borave (zahte vi ugodnosti),

2) zbog proizvodnih zahteva, prema tehnološkom postupku industrijskog procesa (industrijska postrojenja).

U nastavku će biti razmatrane samo karakteristike postrojenja sa zahtevima ugodnosti. U izboru klimatizacionog sistema, važna su tri merila:

- 1) željena ili zahtevana ugodnost,
- 2) investicioni troškovi sistema,
- 3) očekivani pogonski troškovi sistema,

Ova tri merila ne mogu biti razmatrana odvojeno. Na primer, zona ugodnosti jedne savremene administrativne zgrade mora biti razmatrana pre izbora klimatizacionog sistema. Uslovi ugodnosti su različito definisani u različitim zemljama, a u SR Nemačkoj utvrđeni u DIN-u 1946, list 2. Međutim, oni su uopšte uzev određeni tako da je nemoguće te zahteve zadovoljiti bilo kojim sistemom. Zbog toga je važno znati mogućnosti i ograničenja u pogledu održavanja uslova ugodnosti, prilikom izbora sistema instalacija.

Poznato je da je određena razlika između dve glavne grupe sistema. Njih odlikuju sledeće karakteristike:

- 1) sistemi voda — vazduh,
- 2) vazdušni sistemi.

Ova dva sistema su često kombinovana u jednoj zgradi. Sto se tiče industrijske klimatizacije, priлично je jednostavno kontrolisati vazduh i vodu u pogledu temperature, pritiska i vlažnosti. Do teškoća i problema dolazi najpre u klimatizaciji prostorija, u kojima borave ljudi. U najvećem broju slučajeva, intenzitet i vrsta unutrašnjeg kretanja postaju presudni parametri u proceni ugodnosti zato se distribucija vazduha (i izbor elemenata za ubacivanje vazduha moraju obavezno razmatrati.

U slučaju sistema voda — vazduh (najčešće visokopritisnog indukcionog sistema) sistem neposredno određuje strujanje vazduha u prostoriji (uobičajenim položajem jedinice, na primer ispod ili u samom parapetu.

U slučaju čisto vazdušnih sistema, moguće je adaptirati se na postojeće zahteve pogodnim rešenjem ubacivanja vazduha\*. Zato je uloga projektanta postrojenja za klimatizaciju značajnija u pogledu čisto vazdušnih sistema nego što je kada je reč o indukcionim sistemima visokog pritiska. Otuda ovaj širi cilj i veća mogućnost adaptacije na date zahteve čisto vazdušnih sistema znače da se, uopšte uzev, veća ugodnost može ostvariti primenom ovih sistema, nego upotrebom konvencionalnih sistema voda — vazduh. U ovoj konstelaciji, neophodno je ići u detalje u pogledu »zone ugodnosti« i »cilja klimatizacije«.

\* Danas su indukcione jedinice visokog pritiska ugrađene kao plafonske jedinice i vezane sa elementima za ubacivanje vazduha. Za ove izvedbe, napomene ne dolaze u obzir.

## 1.1. Ugodnost i cilj klimatizacije

Osećaj ugodnosti čoveka određuju različiti uticajni faktori. Svaki uticajni faktor proizvodi uticaj različitog intenziteta na ljude. Zbog toga osećaj ugodnosti može biti jedino zabeležen i statistički opisan: uslovi koji znače maksimum ugodnosti za jednu osobu mogu izazvati neugodnost za drugu. Prema istraživačkim radovima Fanger-a o reprezentativnom broju ispitivanih osoba, 5% predstavlja najniži procenat koji se može očekivati od osoba u klimatizovanoj prostoriji, koji uvek oseća termičku neugodnost [1].

U prostorijama bez klimatizacije ovaj procenat je povećan na 40—50%.

Različiti uticajni faktori osećaja ugodnosti za osobe u klimatizovanim prostorijama mogu se svesti na tri glavne grupe, koje su ilustrovane u njihovoj međusobnoj vezi, na sl.1. Samo ako uslovi prostorije odgovaraju šrafiranoj zoni, može se dostići cilj klimatizacije, tj. maksimum ugodnosti.

Koji parametri spadaju u ove tri uticajne grupe?

- 1) uticajni parametar »čovek«
  - fizička aktivnost,
  - nivo aktivnosti (ukupni metabolizam),
  - odeća,
  - fizički uslovi i reakcija;
- 2) uticajni parametar »prostorija«
  - srednja temperatura zračenja,
  - izbor materijala u okolini,
  - slaganje boja,
  - osvetljenje,
  - buka;

- 3) Uticajni parametar »klimatizacija«
- temperatura vazduha u prostoriji,
  - prostorija,
  - kretanje vazduha u prostoriji,
  - buka,
  - čistoća vazduha,
  - obnavljanje vazduha,
  - električne karakteristike vazduha.

Fizička aktivnost, odgovarajući nivo aktivnosti i odeća su veoma važni uticajni faktori termičke ugodnosti. Obavljene su ogromne istraživačke aktivnosti da bi se učinila jasnom kvalitativna i kvantitativna korelacija. Rezultate bi trebalo bar kvalitativno prihvatiti. Uticaj odeće je meren pomoću specifičnog otpora na toplotu.

Tabela 1. pokazuje neke vrste odeće sa odgovarajućim specifičnim otporom prolazu toplote.

Tabela 1. Specifični otpor prolazu toplote različitih vrsta odeće, prema Fangeru [2]

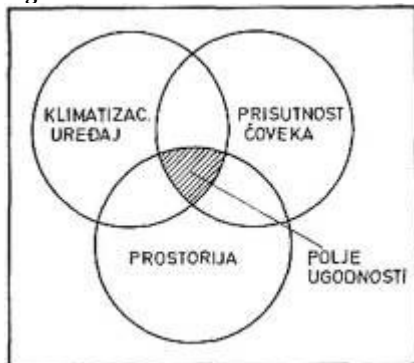
| Odeća               | Specifični otpor prolazu toplote, u m <sup>2</sup> [K/W] |
|---------------------|----------------------------------------------------------|
| Nagi                | 0,155 H0-3                                               |
| Bikini              | 7,55 10=-                                                |
| Laka letnja odeća   | 0,155                                                    |
| Tipično radno odelo | 0,202                                                    |

Slika 2. pokazuje kombinovani uticaj odeće i nivoa aktivnosti na osećaj ugodnosti kao funkcije temperature prostorije.

Funkcija nacrtana na sl. 2. bila je nađena na relativnoj vlažnosti od 50 procenata, pri brzini vazduha u prostoriji od <0,1 m/s. Ova funkcija je vrlo važna, zato što ona jasno dokazuje da ljudi moraju svakako prilagoditi svoju odeću uslovima sredine, kako bi izbegli osećaj neugodnosti zbog neprikladne odeće.

Arhitekt je odgovoran za uticajnu grupu »prostorija«. Najvažniji parametar je srednja temperatura zračenja u prostoriji. Ona može biti merena izvanredno tačno različitim aparatima za merenje temperature.

Sl. 1. Grupe koje utiču na osećaj ugodnosti



na primer termometrom sa crnom kuglom. On je u stanju da pokaže približno sledeći odnos između ugodnosti, temperature vazduha u prostoriji i srednje temperature zračenja.

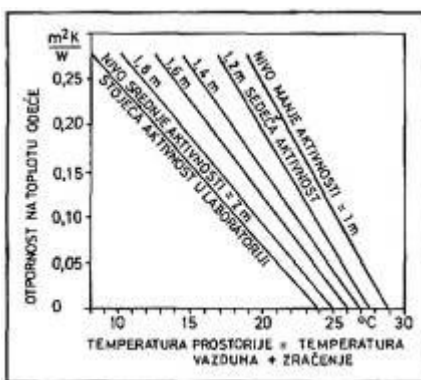
Termička ugodnost preovlađuje, kada pri srednjoj temperaturi zračenja od 20 do 25°C temperatura vazduha u prostoriji ne varira više od 1 do 2 K od te temperature.

Često se registruju praktično veća odstupanja. Ona nastaju uglavnom zbog nedostataka kao što je nedovoljna izolacija spoljnih zidova, suviše visoka temperatura tavanice, suviše velike površine prozora itd.

Kada se proizvodi optimalno osvetljenje — uglavnom problem u velikim sobama i prostorijama u unutrašnjosti zgrade — danas se uočava novi trend: do sada, ujednačeno osvetljenje, bez senki u opsegu od 1000 do 1500 luksa

jačine osvetljenje bilo je pre instalirano u celoj korišćenoj prostoriji, ali sada se intenzivno raspravlja da li bi u budućnosti bilo bolje preći

Sl. 2. Odnos između ugodne temperature u prostoriji i odeće, parametara nivoa aktivnosti i figuracije, prema [2]



na osnovnu iluminaciju od približno 500 lk i lokalnu iluminaciju u radnoj zoni. Postoje fizičari koji kažu da se tako pokreće sposobnost prilagođavanja oka i da se u isto vreme time može izbeći rani umor. Ali postoje i suprotna mišljenja. Diskusija još nije završena.

Ostali parametri uticajne grupe »prostorija« mogu psihološki uticati na osećaj ugodnosti. Tako bi ap-

solutno bilo izbegnuto opremanje velikih biroa isključivo metalnim ili plastičnim nameštajem. Isto tako, jedna dominantna boja bi se zamenila kontrastnim bojama, tako da se oči ne zamaraју. I površinska obrada nameštaja ima važnu ulogu, pa bi nameštaj trebalo da bude projektovan prema ergonomske karakteristikama.

Na isključivo fizičke karakteristike sredine mogu uticati postrojenja za klimatizaciju. Već je spomenuto da nije teško postići ugodne temperature i vlažnost vazduha u prostoriji.

Isto tako, izvesni stepeni čistoće vazduha u prostoriji kao i fiziološki povoljan spektar buke mogu biti sprovedeni u praksi. Intenzitet kretanja vazduha u prostoriji očigledno predstavlja presudniji i odgovorniji parametar ove uticajne grupe.

Ako je prihvatljiv intenzitet kretanja premašen ili je zahtevani intenzitet kretanja u klimatizovanoj prostoriji postignut, postoji razlika, prema vrsti i intenzitetu ovog kretanja, između tri različite reakcije na osećaj neugodnosti čoveka.

#### Prva vrsta reakcije na osećaj neugodnosti.

Izvesne pretežno gole površine kože (kao što su lice, vrat itd.) izložene su mlazovima vazduha ili kretanju vazduha; njihova brzina je toliko visoka, da se ljudi odmah osećaju neugodno.

#### Druga vrsta reakcije na osećaj neugodnosti.

Nakon dugog bavljenja, otprilike 2 časa, u jednoj klimatizovanoj prostoriji, javlja se promaja, koja bi se mogla okarakterisati kao »osećaj Studeni«.

Do ovih reakcija dolazi jedino onda kada forma struje vazduha, čija je temperatura niža od temperatura prostorije u režimu hlađenja i nije dovoljno induktivna. Potom dolazi do nekontrolisanog odvajanja makromolekularnih kugli vazduha od formacije mlaza; ove kugle vazduha prodiru u zonu boravka bez mešanja sa vazduhom u prostoriji i stvaraju veliku razliku temperature, koja proizvodi drugu vrstu reakcije na osećaj neugodnosti. Ova reakcija na osećaj neugodnosti je bila primećena i u klimatizovanim prostorijama u kojima je razlika između temperature vazduha u prostoriji i temperatura ubačenog vazduha — u slučaju delimičnog rashladnog opterećenja — bila održavana na maksimalnim vrednostima tokom izvesnog perioda vremena, ili zbog podešavanja ili zbog sistema sa promenljivom količinom vazduha.

#### Treća vrsta reakcije na osećaj neugodnosti.

Ova reakcija se može opaziti u klimatizovanim prostorijama ako je intenzitet kretanja vazduha suviše mali. Takve »stagnacije« mogu konačno izazvati cirkulacionu iznemoglost ljudi.

Skoro da i ne treba pominjati da jedno klimatizaciono postojanje uglavnom služi obnavljanju vazduha. Još uvek nije određeno koliko električne karakteristike utiču na osećaj ugodnosti samo je dokazana činjenica da takav uticaj postoji.

Prethodni komentari pokazuju kompleksnost problema određenog osećaja ugodnosti i ograničenosti cilja klimatizacije. Ovaj članak ide svesno u detalje da bi odredio granice primene sistema za distribuciju vazduha i moguću vezu sa odgovarajućim sistemom za klimatizaciju.

## 2. AERODINAMIČNOST PROSTORIJE

Zahvaljujući serijama publikacija, proračun kretanja vazduha u redovno provetranim prostorijama je bio od velikog interesa. Nielsen [3] opisuje proračunljivost dvodimenzionalnog, stabilnog turbulentnog strujanja u prostoriji, koja se primenjuje i u slučaju malih temperaturnih razlika između ubačenog vazduha i vazduha u prostoriji.

Wasehke [4] u svojoj doktorskoj tezi govori o strujanju vazduha u prostoriji i prikazuje rotacionu simetriju koju izaziva dovod vazduha kroz radijalne elemente za ubacivanje.

Ali postoji više teza o karakteristikama različitih mlazeva vazduha. Osim osnovnih teza Regenscheita (5.8), moraju se pomenuti istraživanja Detzera [9] koja se odnose na primer na reakciju slobodnih kružnih mlazeva kao i ukazati na saopštenja Schlanze [10] o turbulentnim mešavinama u slobodnim mlazovima, imajući u vidu razlike u gustini.

Zakoni o mlazovima su važne u pripremanju inženjera za vršenje proračuna, više ali manje tačnih, u posebnoj oblasti strujanja vazduha u prostoriji, na primer brzine ili temperature mlaza. To su razlozi zbog kojih će se u nastavku govoriti o izvesnim zakonima o mlazovima, odnosno onih vrsta mlazeva koji najčešće postoje u strujanju vazduha u prostoriji.

### 2.1. Zakoni o mlazovima i ograničenosti tih zakona

Razmatraće se samo najvažniji tipovi mlazeva i to:

- 1) slobodni kružni mlaz,
- 2) slobodni ravan mlaz,
- 3) ravan zidni mlaz.

Duž putanje mlaza iz ispusta vazduha, pravi se razlika između različitih karakterističnih sekcija, ilustrovanih na sl. 3, na primeru slobodnog ravnog mlaza.

U načelu, zakoni o mlazu važe jedino za glavnu sekciju [2] mlaza. Dužina jezgra odnosno polazna sekcija jednog mlaza, predstavlja u stvari dužinu putanje mlaza, do čije brzine na izlazu  $u_0$  dolazi poslednji put u toku proticanja

mlaza. Jedino je u glavnoj sekciji profil strujanja potpuno razvijen i pogodno je da širina mlaza  $y_a$  bude proporcionalna dužini putanje mlaza [11]. O ovom fenomenu ne bi trebalo više raspravljati, pošto je o njemu dovoljno pisano u literaturi. Ono što ćemo izneti u nastavku, odnosi se na zakone o mlazu.

#### 2.1.1. Slobodni kružni mlaz

##### 2.1.1.1. Izotermički proces strujanja

Pri usporavanju brzine u osi mlaza, najveća brzina, i otuda brzina koja je najmerodavnija za osećaj, može se označiti odnosom:

$$u_m = u_0 \cdot \frac{x_0}{x} \quad (1)$$

$u_m$  — brzina u osi mlaza,  
 $u_0$  — brzina na izlazu mlaza,  
 $x_0$  — dužina jezgra mlaza,  
 $x$  — dužina putanje mlaza.

Dužina jezgra  $x_0$ , određena eksperimentalno, može se objasniti na sledeći način:

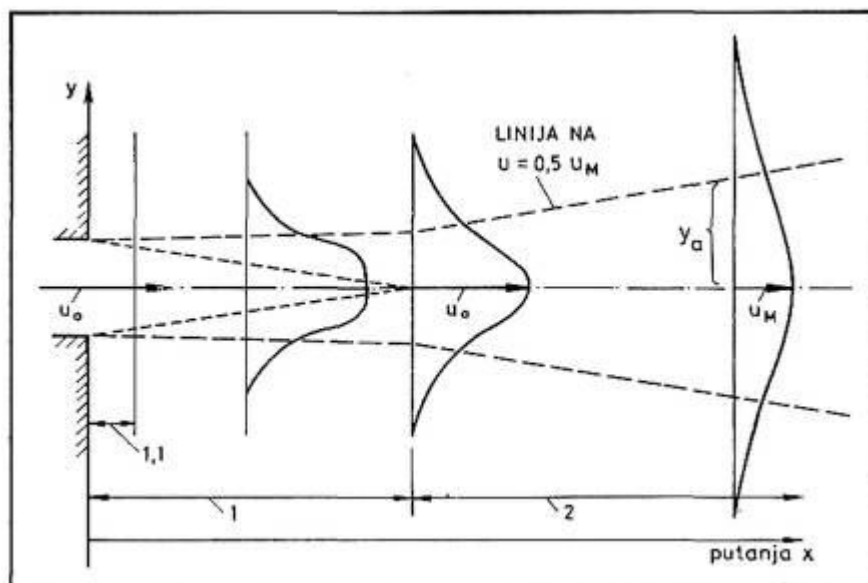
$$x_0 = \frac{d_0}{m} \quad (2)$$

gde je  $d_0$  — prečnik otvora mlaza, a  $m$  — broj mešanja. Sl. 4, sa karakteristikama slobodnog kružnog mlaza, trebalo bi da se uporedi sa ovim.

Broj mešanja  $m$  je funkcija nekoliko uticajnih podataka.

$$m = f \left( \begin{array}{l} \text{Stepen turbulencije} \\ \text{Vrsta mlaza} \\ \text{Re broj} \\ \text{Geometrija ispusta} \end{array} \right)$$

Sl. 3. Objašnjenje karakterističnih sekcija mlaza; 1) početna sekcija = dužina jezgra; 1.1. dužina laminarne putanje; 2. glavna sekcija;  $u_0$  — brzina na otvoru ispusta;  $u_m$  — brzina u osi; a) linija na  $u = 0,5 u_m$ ; b) putanja  $x$ .



Srednja vrednost je;

$$m = 0,15 \quad (3)$$

može se prihvatiti. Detzer ukazuje da — za proračun putanje mlaza sa bilo kakvim »poremećajima«, koja uzrokuje izlaz vazduha — dužina jezgra i Eulerov broj (Eu) moraju biti poznati. Eu broj je odnos između normalnih sila (sile pritiska) i inercionih sila, što je najčešće definisano kako sledi:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot v^2} \quad (4)$$

gde je:

Eu — Eulerov broj,  
 $\Delta p$  — razlika pritiska,  
 $\rho$  — gustina fluida,  
 $v$  — brzina karakterističnog strujanja.

Detzer povezuje Eulerov broj sa dimenzijama izlaza (npr.  $u_0$  i  $d_0$ ). Graeff [12] je u prvom istraživanju izjavio da jednačina (1) ne opisuje više tačno ponašanje mlaza pri stvarnim — praktičnim brzinama strujanja na izlazima koje obično iznose  $< 4$  m/s. Iskustvo pokazuje da se pri brzinama mlaza koje nastaju u klimatizaciji, jednačina (1) primenjuje jedino za izotermičke procese približno sa tačnošću od  $+ 20\%$ . Pa ipak, ova jednačina je veoma korisna za procenu, koja se može objasniti na nekoliko primera.

Primer 1. Pojedinačne mlaznice bi trebalo montirati na tavanici. Ulazni vazduh, koji dolazi iz mlaznice prečnika 40 mm, struji vertikalno nadole u prostoriju čija je visina 3 m, sa brzinom izlaza od 3 m/s. Prihvaćeno je da zona

boravka bude zona iznad poda, visoka 1.8 m.

Pitanje: Koja je brzina ose mlaza nakon 12 m, tj. u zoni boravka?

Poznato je:  $u_0 = 3 \text{ m/s}$ ,  $d_0 = 0,04 \text{ m}$ ,  $x = 1,2 \text{ m}$

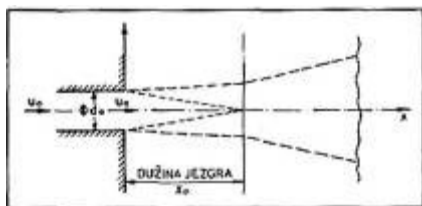
m prema (3) = 0,15

Iz jednačine (1) i (2) izlazi da je:

$$u = 3 \frac{0,04}{0,15 \cdot 1,2} = 0,67 \text{ m/s}$$

Interpretacija rezultata. Već u izotermičkom procesu strujanja, može se očekivati velika promaja u zoni boravka. Ovo rešenje sigurno ne može biti realizovano u domenu ugodnosti.

Sl. 4. Karakteristike: kružni slobodni mlaz



Primer 2. Jedan linearan induktivni i strujni element je instalisan na tavanici prostorije. Ugrađena je jedna kružna mlaznica koja se otvara posle druge, sa prečnikom od 0,02 m. Iz nje, dovodni vazduh u obliku slobodnih mlazeva struji kaso i promenljivim pravcem pod uglom od 45°C.

Dati su:

- visina sobe  $H = 1,8 \text{ m}$ ,
- visina zone boravka  $H_A = 1,8 \text{ m}$ ,
- brana na izlazu  $u_0 = 3 \text{ m/s}$ ,
- prečnik mlaznice  $d_0 = 0,02 \text{ m}$ ,
- broj mešanja  $m = 0/15$ .

Pitanje glasi: koliko je velika brzina u osi mlaza, kada dosegne zonu boravka.

**Proračun,** 1) Pronalaženje putanje mlaza od ispusta do zone boravka:

$$x = \sqrt{2(H - H_A)} = 1,7 \text{ m}$$

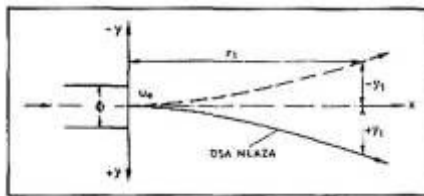
2) Određivanje brzine u osi mlaza nakon putanje mlaza  $x = 1,7 \text{ m}$ ; kao i u primeru 1,

$$u = 3 \frac{0,02}{0,15 \cdot 1,7} = 0,24 \text{ m/s}$$

Interpretacija rezultata. Izotermički ne dolazi do promaje, ali je moguća pri rashladnom režimu. Proračune bi trebalo izvršiti za neizotermički proces ili izvršiti eksperiment.

Oba ova primera bi trebalo da budu dovoljna. Zahvaljujući činjenici da se pretpostavlja da je momenat mlaza konstantan duž putanje mlaza, jednostavno je, naravno, izračunati povećanje zapremine

Sl. 5. Karakteristike horizontalno uduvanog kružnog slobodnog mlaza (neizotermičkog)



mlaza kao i, na primer, približne temperature mešanja u mlazu dovodnog vazduha, kao funkcije putanje mlaza.

#### 2.1.1.2. Neizotermički proces strujanja

Za proračun hladnih ili toplih mlazeva dovodnog vazduha poznate su jednačine za proračun. Među tri karakteristična procesa strujanja trebalo bi da se napravi razlika:

- a) neizotermički kružni slobodni mlaz struji horizontalno  $\rightarrow$ ;
- b) struji vertikalno odozgo nadole  $\downarrow$ ;
- c) struji vertikalno odozgo nagore  $\uparrow$ .

Zavisno od činjenice da se termičke sile sabiraju u momentu sile (hladan mlaz u toploj sobi  $\downarrow$ ) ili da se suprotstavljaju jedan drugom (topli mlaz u hladnoj sobi  $\uparrow$ ), na opadanje brzine u osi mlaza utiču tri slučaja  $\rightarrow$ ,  $\downarrow$ ,  $\uparrow$ , kao što i pri horizontalnom strujanju utiče takođe putanja.

U vezi sa slučajem a), postoji mnogo jednačina koje se odnose na putanju neizotermičkog, horizontalnog izduvanja vazdušnih mlazeva, koje je, na primer, upoređivao Mullejans [13]. Sl. 5. ilustruje ostale detalje.

U zavisnosti od jednačine koja je u celini indicirana u [13], svi se rezultati razlikuju po povećanju putanje mlaza tako da je nemoguće razmatrati tačnost rezultata. Kako se jednačina Regenscheita može smatrati srednjom vrednošću varijanta rezultata, to bi je trebalo uzeti za formulu proračuna putanje:

$$y = 0,33 \cdot d_0 \cdot m \cdot Ar \left( \frac{x}{d_0} \right)^3 \quad (5)$$

$y$  — defleksija mlaza,  
 $Ar$  — Arhimedov broj

$$= \frac{g \cdot d_0 \cdot \Delta v}{u_0^2 \cdot T_R} = \frac{\text{termička sila potiska}}{\text{sila inercije}} \quad (6)$$

$g$  — akceleracija usled gravitacije,  
 $\Delta v$  — karakteristična temperaturna razlika (na primer, temperatura vazduha u postariji minus temperatura dovodnog vazduha),

$T_R$  — apsolutna temperatura vazduha u prostoriji.

Dva primera će objasniti primenu jednačine.

Primer 1. Jedna proizvodna hala treba da ima klimatizaciju. Širina hale je 50 m, a na obema stranama dovodni vazduh bi trebalo da bude ubačen preko mlaznica, čiji je prečnik 100 mm, a izlazna brzina  $u_0 = 10 \text{ m/s}$ . Da bi se odredila visina izlaznih otvora, treba da bude izračunata defleksija  $y_1$  za horizontalnu koordinatu  $x_1 = 25 \text{ m}$ . Razlika temperatura biće pri maksimalnom rashladnom opterećenju  $\Delta \vartheta_{\max} = 8 \text{ K}$  pri 22°C temperature hale.

1. Izračunavanje  $Ar$  broja:

$$(6) \quad Ar = \frac{g \cdot d_0 \cdot \Delta v}{u_0^2 \cdot T_R}$$

$$= \frac{9,81 \cdot 0,1 \cdot 8}{10^2 \cdot 295}$$

$$= 2,66 \cdot 10^{-4}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

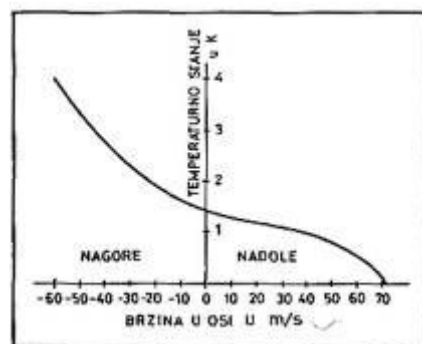
$$d_0 = 0,1 \text{ m}$$

$$\Delta v = 8 \text{ K}$$

$$u_0 = 10 \text{ m/s}$$

$$T_R = 295 \text{ K}$$

Sl. 6. Primer: Uticaj temperaturnih slojeva na brzinu u osi;  $H = 14 \text{ m}$ ,  $x = 10 \text{ m}$ ,  $d_0 = 0,06 \text{ m}$ ,  $u_0 = 6,4 \text{ m/s}$ ,  $m = 0,2$ ,  $\Delta v_0 = 5,5 \text{ K}$



2. Izračunavanje defleksije mlaza:

$$(5) \quad y_1 = 0,33 \cdot 0,1 \cdot 0,15 \cdot 2,66 \cdot$$

$$\cdot 10^{-4} \left( \frac{25}{0,1} \right)^3$$

$$y_1 = 20,57 \text{ m}$$

Interpretacija rezultata. Sa teškoćama sprovođenja u praksi, mlaz vazduha bi duvao koso nagore pod izvesnim uglom na horizontalnu liniju. Rezultat je sasvim neizvestan, pošto pri takvim visinama hale temperature slojeva mogu znatno uticati na putanju.

**Primer 2.** Kao 1, ali u režimu grejanja i temperaturnoj razlici dovodnog i sobnog vazduha koja iznosi 30 K.

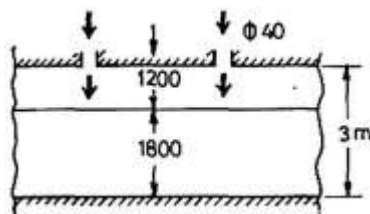
$$(6) Ar = \frac{9,81 \cdot 0,1 \cdot (-30)}{10^2 \cdot 295} = -10^{-3}$$

$$y_1 = 0,33 \cdot 0,1 \cdot 0,15 \cdot (-10^{-3}) \cdot$$

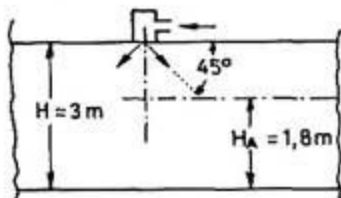
$$\cdot \left( \frac{25}{0,1} \right)^3 = -77 \text{ m}$$

$$\Delta v = -30 \text{ K (temperatura sobnog vazduha minus temperatura dovodnog vazduha)}$$

Primer 1.



Primer 2.



**Interpretacija rezultata.** Ne smatrajući da je rezultat iluzoran, može se izvesti sledeće. Topli dovodni vazduh će grejati krov hale, ali ne i zonu boravka. Temperaturna razlika mora biti smanjena.

U vezi sa b), na brzinu u osi kružnog slobodnog mlaza, koja duva vertikalno nagore presudno utiče odnos termičke sile potiska (uzgona) i sile inercije, tj. Arhimedov broj.

Ukoliko u prostoriji nema velikih temperaturnih raslojavanja npr. u klimatizovanim prostorijama do 3,5 m visine — može se primeniti sledeća formula za izračunavanje, kao srednja vrednost poznatih rezultata prema Regenischeitu [14].

$$\frac{u_M}{u_0} = \frac{x_0}{x} \pm$$

$$\pm \sqrt{\frac{Ar}{m} \left[ 1 + \ln \left( 2 \frac{x}{x_0} \right) \right]} \quad (7)$$

+ √ u slučaju da hladni mlaz struji u toplu prostoriju i

— √ u slučaju da topli mlaz struji u hladnu prostoriju.

Primer 1. iz poglavlja 2.1.1. trebalo bi da ponovo objasni međusobnu vezu odnosno reakciju termičke sile.

**Primer.** Prečnik mlaznice 40mm; brzina vazduha na izlazu 3 m/s; struji vertikalno nagore; dužina putanje mlaza 1,2 m, na 3 m visine prostorije; temperaturna razlika između vazduha u prostoriji i dovodnog vazduha:

1.  $\Delta v = 8 \text{ K}$  (režim hlađenja)
2.  $\Delta v = -5 \text{ K}$  (režim grejanja)

Pitanje: Koja je brzina u osi mlaza na visini od 1,8 m iznad poda?

Proračun glasi:

$$u_0 = 3 \text{ m/s, } im = 0,15, d_0 = 0,04 \text{ m}$$

$\Delta v = 8 \text{ K} / -5 \text{ K}$ ; temperatura sredine je  $22^\circ \text{C}$

1. Proračun Ar broja; režim hlađenja:

$$Ar = \frac{g \cdot \Delta v \cdot H}{u_0^2 \cdot T_u} \quad (H = \text{visina prostorije})$$

$$= \frac{9,81 \cdot 8 \cdot 3}{3^2 \cdot 295}$$

Režim grejanja:

$$Ar = \frac{9,81 \cdot 5 \cdot 3}{3^2 \cdot 295} = 0,0554$$

2. Proračun brzine u osi mlaza: Režim hlađenja:

$$(7) u_M = u_0 \left\{ \frac{x_0}{x} + \sqrt{\frac{Ar}{m} \left[ 1 + \ln \left( 2 \frac{x}{x_0} \right) \right]} \right\}$$

$$u_M = 3 \frac{0,04}{0,15 \cdot 1,2} + \sqrt{\frac{0,09}{0,15} \left[ 1 + \ln \left( 2 \frac{1,2 \cdot 0,15}{0,04} \right) \right]}$$

$$= 4,79 \text{ m/s}$$

Iz primera 1, u poglavlju 2.1.1.1, za izotermički proces strujanja:

$$\frac{u_M}{u_0} = \frac{x_0}{x} - \sqrt{\frac{Ar}{m} \left\{ 1 + \ln \left( \frac{2x}{x_0} \right) + \frac{\Delta \vartheta R}{\Delta \vartheta_0} \cdot \frac{x_0}{H} \left[ \left( \frac{x}{x_0} \right)^2 - 0,25 \right] \right\}} \quad (8)$$

2) Hladni, kružni, slobodni mlaz struji u tople prostorije, sa temperaturnim slojevima u prostoriji:

$$u_M = 0,67 \text{ m/s}$$

Režim grejanja:

$$(7) u_M = u_0 \left\{ \frac{x_0}{x} - \sqrt{\frac{Ar}{m} \left[ 1 + \ln \left( 2 \frac{x}{x_0} \right) \right]} \right\}$$

$$u_M = 3 \left\{ \frac{0,04}{0,15 \cdot 1,2} - \sqrt{\frac{0,09}{0,15} \left[ 1 + \ln \left( 2 \frac{1,2 \cdot 0,15}{0,04} \right) \right]} \right\}$$

$$= -2,59 \text{ m/s}$$

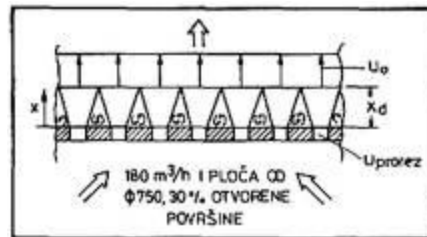
**Interpretacija rezultata.** Proračun rezultata pokazuje znatan uticaj termičkih sila. U režimu hlađenja mlaz dovodnog vazduha duboko prodire u prostoriju, odnosno u 3 m visokoj prostoriji on dopire do poda i u režimu grejanja, dovodni vazduh će ostati u sloju ispod tavanice. Zaključak bi mogao biti da se ne mogu očekivati stabilni uslovi vazdušnog strujanja u prostoriji, niti se mogu koristiti rezultati proračuna.

Osobito u prostorijama koje su visoke (kao što su pozorišne i koncertne dvorane, kongresne sale i proizvodne hale), uticaj (različitih temperaturnih slojeva na obrazovanje mlaza i na smanjenje brzine u osi, ne može se izbeći. Zbog toga se jednačina (6) više uopšte ne primenjuje. Za proračun odnosa brzina, mogu se primeniti sledeće jednačine. One su isto tako u skladu sa prosečnim vrednostima poznatih rezultata [15].

Sledeća korelacija rezultira bezdimenzijskog odnosa brzine u osi  $u_M$  i brzine na izlazu mlaza  $u_0$ :

1) Topli, kružni slobodni mlaz struji u hladnu prostoriju, sa temperaturnim slojevima u prostoriji:

Sl. 7.



$$\frac{u_M}{u_0} = \frac{x_0}{x} + \sqrt{\frac{Ar}{m} \left\{ 1 + \ln \left( \frac{2x}{x_0} \right) - \frac{\Delta \vartheta R}{\Delta \vartheta_0} \cdot \frac{x}{H} \left[ \left( \frac{x}{x_0} \right)^2 + 0,25 \right] \right\}} \quad (9)$$

ako je negativno, onda potkorena vrednost dobija negativni znak

$\Delta v_0$  — temperaturna razlika na izlazu,

$\Delta v_R$  — temperatura vazduha u prostoriji ispod tavanice, minus temperatura vazduha u prostoriji pri podu (raslojavanje).

Isto tako, jedan primer će objasniti uticaj temperaturnih slojeva na mlaz.

**Primer.** Jednu (konferencijsku) salu, 14 m visoku, treba klimatizovati pomoću individualnih vazдушnih mlazeva sa tavanice. Prečnik mlaznice će biti 60 mm, a brzina na izlazu je  $u_0 = 6,4$  m/s ( $\Delta_0 = 65$  m<sup>3</sup>/k i mlaznici). Razlika temperature na izlazu bi trebalo da bude  $\Delta v_0 = 5,5$  K, a temperaturna razlika između vazduha u prostoriji ispod tavanice i onoga blizu poda, treba da ima sledeće vrednosti:

(raspored u slojevima)

$$\Delta v_R = 0/1/2/3/4 \text{ K}$$

Pitanje: Koju brzinu mlaza treba očekivati nakon putanje mlaza od  $x = 10$  m, kao funkcije temperaturnih slojeva u prostoriji?

Rezultat: Proračun prema jednačini (9) nije izveden, u detaljima, ali je rezultat ilustrovan na sl. 6.

**Interpretacija rezultata.** Na temperaturnim slojevima od 1,5 K mlaz vazduha dostiže brzinu

centralnog mlaza od 0, nakon putanje mlaza od 1 m; u slučaju povećanja temperaturnih slojeva, prodor mlaza vazduha je manji od 10 m; ako su temperaturni slojevi manji od 1,5 K, vazdušni mlaz, nakon putanje mlaza od 10 m, postiže konačne usponske brzine do 70 m/s.

**Zaključak.** U zavisnosti od zauzetosti hale i aktivnosti dolazi do različite temperaturne slojevitosti, tj. nekad ima promaje a nekada je nema.

U vezi sa c), treba reći da se danas strujanje vazduha odozdo nagore sa ispustima vazduha u podu, ne primenjuje samo u prostorijama sa visokom proizvodnjom toplote, nego i u specijalnim zahtevima u pogledu ugodnosti.

Ako se temperaturni slojevi ne uzmu u obzir, jednačina (7) će se primeniti, ali sa drugom tačnošću:

$$(7) \quad \frac{u_M}{u_0} = \frac{x_0}{x} \pm \sqrt{\frac{Ar}{m} \left[ 1 + \ln \left( 2 \frac{x}{x_0} \right) \right]}$$

Važi:

+  $\sqrt{\quad}$  u slučaju da topli mlaz struji u hladnu prostoriju,  
—  $\sqrt{\quad}$  u slučaju da hladni mlaz struji u toplu prostoriju,

Ovde se izvodi drugi primer proračuna.

**Primer.** Okrugle, prosečne ploče kao vazdušni ispusti ugrađene su u podnom plenumu za dovod vazduha. One imaju prečnik od 750 mm. Deo količine vazduha na svakom vazdušnom ispustu biće 180 m<sup>3</sup>/h.

Pitanje: koja je kvalitativna putanja strujanja i koja je dužina jezgra mlaza?

Odgovor: strujanje kroz ploču, izduženje pojedinih mlazeva nakon ispusta i obrazovanje mlaza sa novom početnom brzinom  $u_0$  = brzina pomeranja (u vezi sa površinom ispusta), ilustrovani su na sl. 7.

Prema naznačenim podacima i u zavisnosti od kvaliteta ulaza u šlic, dobija se brzina  $u_s$  od 0,3 do 0,41 m/s. U oblasti putanje mlaza  $x_d$  ova brzina  $u_s$  od 0,37 do 0,47 m/s se smanjuje do brzine pomeranja, u odnosu na ispust  $u_0 = 11,3$  m/s, kaja se može smatrati početnom brzinom novoformiranog mlaza.

Dužina jezgra na prečniku mlaza  $d_0 = 0,75$  m i broj mešanja  $m = 0,15$  m (sigurno suviše veliki) je:

$$x_0 = \frac{d_0}{m} = \frac{0,75}{0,15} = 5,0 \text{ m}$$

Interpretacija rezultata. Dužina jezgra, koja ima vrednost od 5,0 m, je veća od normalne visine prostorije. To znači da u izotermičkom slučaju vazduh u prostoriji ne može biti intenzivno pomešan. Najmanja poprečna konvekcija i temperaturni slojevi pomeraju osu mlaza. Mogu se postići uslovi stacionarnog i pravilnog strujanja.

Nakon opisanih oblika strujanja, sledi razmatranje slobodnog mlaza.

(Nastavak u sledećem broju)